

UNIWERSYTET MIKOŁAJA KOPERNIKA W TORUNIU

WYDZIAŁ FIZYKI, ASTRONOMII I INFORMATYKI STOSOWANEJ

PRACA INŻYNIERSKA

„TOMOGRAFIA ANIHILACJI POZYTONÓW”

Imię i nazwisko: Anna Kozłowska

Nr indeksu: 210588

Kierunek: Fizyka Techniczna

Specjalność: Miernictwo Komputerowe

Promotor: prof. dr hab. Grzegorz Karwasz

Spis treści:

1. Wstęp.....	3
1.1 Metody otrzymywania pozytonów.....	4
1.2 Akceleratory cząstek	4
2. Radioizotopy promieniotwórcze.....	11
2.1 Rozpady promieniotwórcze	12
2.2 Układ pomiarowy czasów życia pozytonów.....	18
2.3 Wyniki pomiarów za pomocą licznika G - M.....	20
3. Zastosowanie radioizotopów w medycynie	22
3.1 Wnioski	37

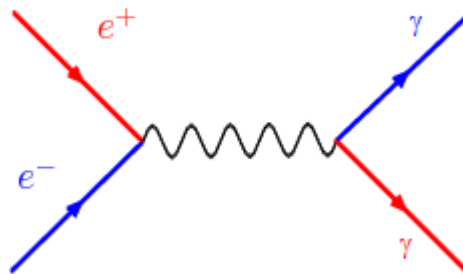
Literatura

1. A.Z. Hryniewicz, Fizyczne metody diagnostyki medycznej i terapii, PWN, Warszawa 2000,
2. C. Kittel, Wstęp do fizyki ciała stałego, PWN, Warszawa 1999
3. S. Nowak, K. Rudzki, Zarys medycyny nuklearnej, PZWL 2002
4. D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, Podstawy fizyki, Fizyka jądrowa, PWN, Warszawa 2005, tom 5
5. A. Strzałkowski, Wstęp do fizyki jądra atomowego, PWN, Warszawa 1978
6. S. Waldemar: Akceleratory biomedyczne., PWN, Warszawa 1994, s.474
7. G. Pawlicki, T. Pałko, Fizyka medyczna, EXIT 2006, tom 9
8. J.M Janik, Fizyka chemiczna, PWN, Warszawa, 1989, rozdział 2 i 9

1. Wstęp

Anihilacja jest to proces oddziaływania cząstki elementarnej z odpowiadającą jej antycząstką. W rezultacie tego zdarzenia występuje przemiana powyższych cząstek w inne formy materii. Może to być na przykład transformacja elektronu i pozytonu w kwanty γ (dwa lub trzy, bardzo rzadko jeden). Proces anihilacji ilustruje schemat (1).

$$e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma \quad (1.1)$$



Rys. 1.2 Schemat przebiegu procesu anihilacji pozytonu i elektronu. Linia falowa pomiędzy stanem początkowym i końcowym ilustruje stany pośrednie, np. bozony oddziaływań słabych.

Energie spoczynkowe pozytonu jak i elektronu są takie same i wynoszą 511 keV. Gdy obie cząstki mają zerową prędkość czyli pęd pary, która anihiluje, jest także równy zero, a ich całkowity spin wynosi też zero, to energie dwóch kwantów anihilacyjnych wynoszą 511 keV i rozchodzą się pod kątem 180° .

Proces anihilacji pozytonów jest zgodny z podstawowymi prawami fizyki, tj. z zasadami zachowania:

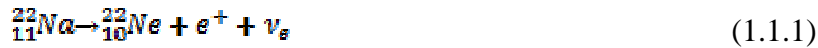
- energii,
- spinu,
- pędu.

I tak, jeśli spin początkowy pary elektron- pozyton wynosił 1, to anihilacja prowadzi do powstania trzech kwantów gamma a ich energie są mniejsze od 511 keV.

1.1 Metody otrzymywania pozytonów

Istnieje kilka metod wytwarzania pozytonów w laboratorium:

- a) Rozpad β^+ izotopów promieniotwórczych [8], np.



- b) Kolizje wysokoenergetycznych cząstek elementarnych,
c) Promieniowanie kosmiczne,
d) Akceleratory cząstek (np. EPOS ELBE)

1.2 Akceleratory cząstek

Wytwarzanie pozytonów w akceleratorze

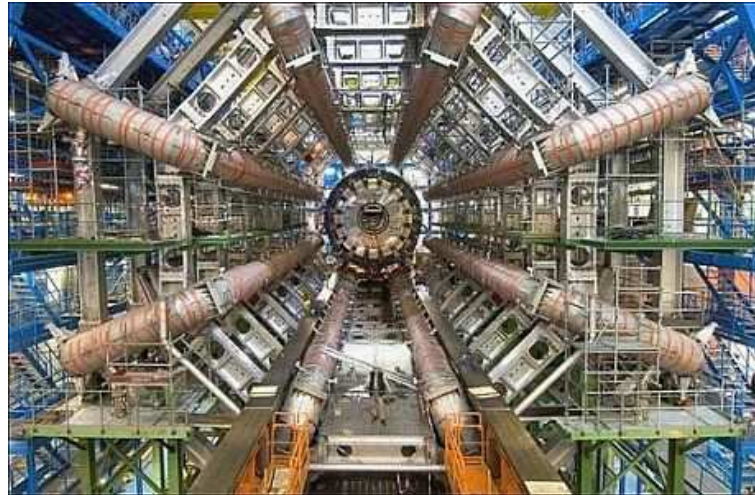
Akcelerator jest to urządzenie służące do przyspieszania cząstek oraz jonów do dużych prędkości, nawet zbliżonych do prędkości światła. Działanie akceleratorów opiera się o oddziaływanie z ładunkiem elektrycznym, w które zaopatrzone są cząstki ulegające przyspieszeniu w polu elektrycznym; wykorzystujemy to zjawisko w wiązkach pozytonów, elektronów, protonów, antyprotonów oraz ciężkich jonów. Aby nadać cząstkom odpowiedni kierunek i skupić je w wiązkę stosuje się odpowiednio ukształtowane pole elektryczne albo magnetyczne, które może dodatkowo zmieniać się w czasie. Pole elektryczne jest wytwarzane na przykład przez układy generatorów o bardzo wysokim napięciu, a następnie jest dostarczane innym układom elektrod, natomiast pole magnetyczne jest tworzone za pomocą bloków elektromagnesów, które znajdują się na całym obwodzie akceleratora. Możliwe są różne geometrie akceleratorów, z uwagi na różnice w sposobach przyspieszania cząstek a także z uwagi na potrzeby, jakie powinna spełniać wiązka (badanie cząstek elementarnych, zastosowanie biomedyczne, zastosowania techniczne itd.).

Podział akceleratorów

Akceleratory można sklasyfikować pod względem:

- kształtu toru ruchu cząstek, które uległy przyspieszeniu (liniowe, cykliczne)
- sposobu przyspieszania (napięcie stałe, indukowane, o wysokiej częstotliwości, wielostopniowe)

- rodzaju przyspieszanych cząstek (akceleratory elektronów, protonów, ciężkich jonów)
- maksymalnej energii przyspieszenia (keV, MeV, GeV)
- gradientu pola przyspieszającego (zmiennego, stałego)



Rys.1.2.1 Kołowy akcelerator cząstek.

Podział akceleratorów ze względu na sposób przyspieszania i kształt toru:

- liniowe (cząstki ulegające przyspieszeniu na prostym odcinku), czyli o stałym napięciu przyspieszającym (van der Graffa, tandem Cockcrofta – Waltona) oraz o napięciu przyspieszającym wysokiej częstotliwości (liniowy z falą stojącą i bieżącą)
- cykliczne, czyli synchroniczne (cyklotron, synchrotron elektronowy, protonowy, mikrotron, synchrocyklotron) a także asynchroniczne (akcelerator wiązek przeciwbieżnych, plazmowy, betatron).

Omówienie przykładów akceleratorów [6]

LINAC (Akcelerator liniowy) – jest to rodzaj akceleratora, w którym cząstki przyspieszane poruszają się po torach, które są w przybliżeniu prostoliniowe.

Pole elektryczne używane jest do przyspieszania:

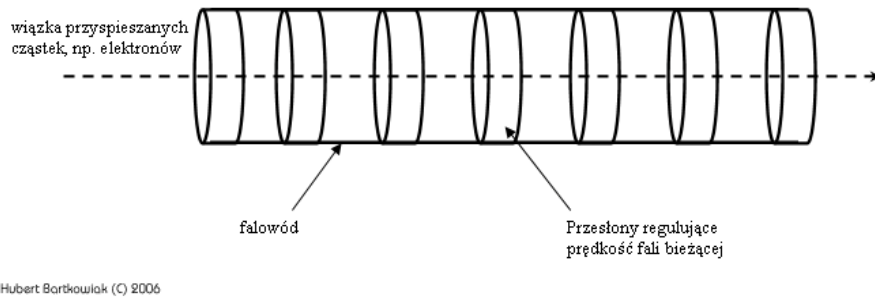
- o stałej wartości i kierunku np. akcelerator elektrostatyczny
- o wysokiej częstotliwości i zmiennej wartości(indukowane synchronicznie z przelotem cząstek przez szczeliny w układzie cylindrycznych elektrod)
 - pole elektryczne fali elektromagnetycznej - akcelerator liniowy z falą bieżącą
 - pole elektryczne fali stojącej - akcelerator liniowy z falą stojącą, która jest indukowana w falowodzie.



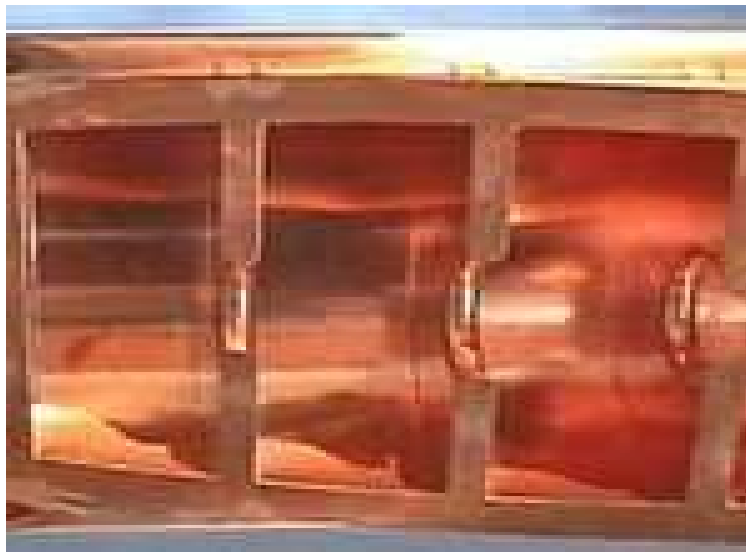
Rys.1.2.2 Akcelerator liniowy (LINAC).

Energia zderzenia w liniowym akceleratorze wiązek przeciwbieżnych elektronów i pozytonów wynosi do 50 GeV.

Akcelerator z falą bieżącą – jest to rodzaj akceleratora, w którym zastosowano bieżące fale elektromagnetyczne. Wytworzono je w falowodzie o konstrukcji, która przeciwdziała odbiciu fali. Dzięki odpowiedniej konstrukcji nie dochodzi tu do odbijania fal. W takim falowodzie występuje przemieszczanie się pola elektrycznego fali z szybkością równą prędkości cząstek przyspieszanych. Aby uzyskać właściwą prędkość fazową należy skonstruować odpowiednie przegrody. Zanim cząstki dostaną się do tego akceleratora muszą być już wcześniej przyspieszone w innym akceleratorze do prędkości niewiele mniejszych od prędkości światła. Przykładem takiego urządzenia jest akcelerator z falą bieżącą znajdujący się w Stanford w USA. Ma on długość 3 kilometrów.



Rys.1.2.3 Przekrój przez kanał akceleratora liniowego z falą bieżącą.

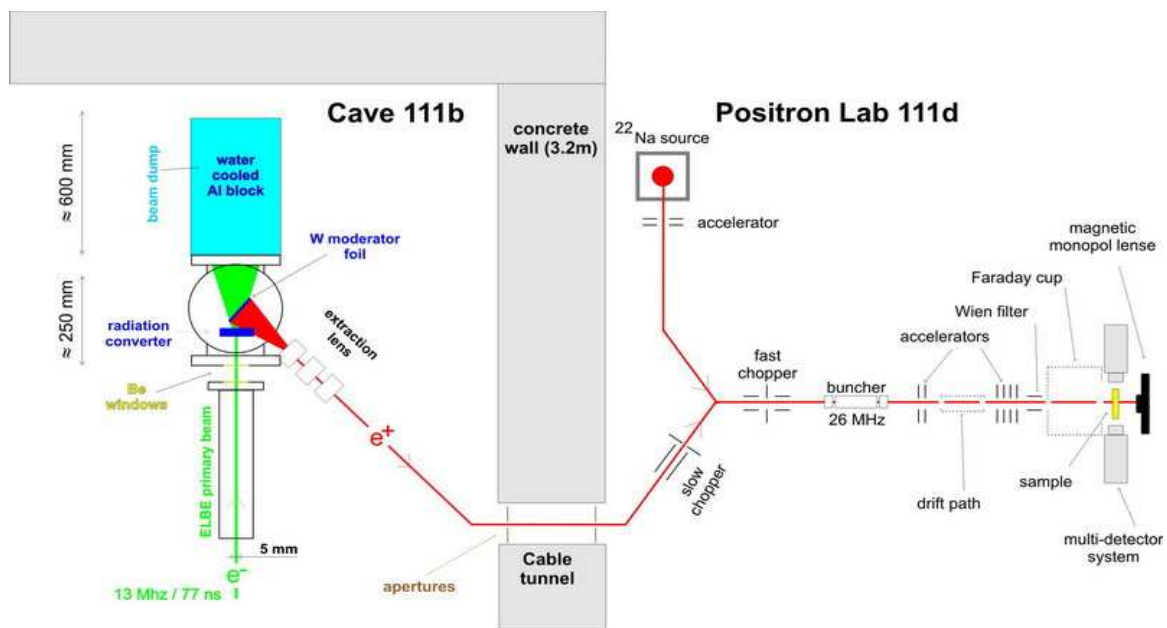


Rys.1.2.4 Przekrój akceleratora SLAC w Stanford.

EPOS ELBE znajdujący się w Dreźnie jest akcelerator służącym do wytwarzania pozytonów. Źródło promieniowania ELBE jest zbudowane z 250 keV działa elektronowego produkującego pulsującą wiązkę elektronów (częstotliwość 13MHz) w połączeniu z dwuetapowym akceleratorem liniowym. Energia 20 MeV może być zaaplikowana do każdej z jednostek przyspieszających.

Nadzwyczajną cechą wiązki elektronów wytworzonych w ELBE jest fakt, że może ona być dobrze skonfigurowana zarówno jeśli chodzi o czas jak i szerokość wiązki. Wszystko może być ustawione zgodnie z oczekiwaniami dla danego eksperymentu. Możliwe są 3 różne rodzaje pulsacji:

- **mikropulsacja** - szerokość impulsu jest z przedziału 1-5 ps. Częstość pulsacji wynosi $n \times 13 \text{ MHz}$, gdzie n zawiera się w przedziale 1 do 7,
- **makropulsacja** - podobnie jak w mikropulsacji, tyle, że szerokość impulsu jest w przedziale od 0.1 ms do 40 ms,
- **tryb pojedynczego impulsu** - wybierana jest liczba impulsów do wygenerowania (od 1 do 4096), ustawiany jest czas odstępu pomiędzy impulsami (od 1 ms do kilku min).



Rys.1.1.7 Schemat budowy akceleratora EPOS ELBE.

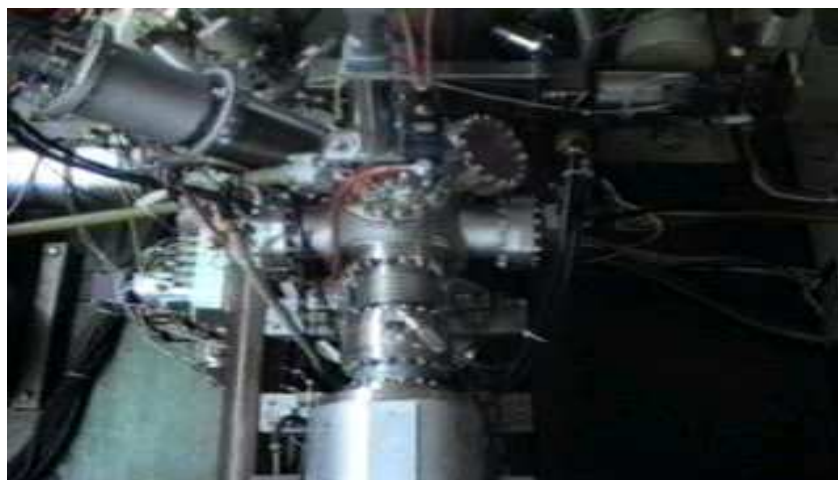
Promieniowanie hamowania - Bremsstrahlung

Jest to promieniowanie elektromagnetyczne, które powstaje podczas szybkich zderzeń elektronów z materią. Zjawisko powstawania promieniowania hamowania jest procesem odwrotnym do zjawiska fotoelektrycznego. W tym procesie powstaje foton, którego pęd i energia pochodzi od zderzenia się jądra i elektronu. Nie mamy tu do czynienia z absorpcją ani rozpraszaniem przez materię, lecz z kreacją fotonów. Promieniowanie jest jednym ze sposobów zaniku energii przez naładowaną cząstkę, która się porusza. Wielkość tej utraty na jednostkę drogi określa wzór [3] :

$$\left(\frac{dE}{dx}\right) \approx Z^2 \times N \times E \quad (1.2.5)$$

gdzie: E - energia elektronów.

UNILAC - jest to akcelerator, który przyspiesza jony do 0,1c. Można go wykorzystać do przyspieszania jonów począwszy od wodoru, a kończąc na jonach uranu. W 1990 roku dodano SIS oraz ESR, które powodują rozpędzanie jonów aż do 0,9c. Dzięki akceleratorowi ciężkich jonów SIS oraz rozdzielaczowi wiązek FRS i pierścieniowi przetrzymującemu EPR, możliwe jest przechowywanie, przyspieszanie i chłodzenie wiązek jonów każdego pierwiastka. Badaniu poddaje się stabilne i niestabilne izotopy, jednak istotną rolę odgrywają bardzo intensywnie naładowane jony. W badaniach istotną rolę odgrywają procesy oraz ich właściwości zachodzące w środku powłoki atomu. Przykładem mogą być eksperymenty z ciężkimi atomami wodoropodobnymi, czyli posiadającymi tylko jeden elektron na swojej powłoce.



Rys.1.2.6 Akcelerator UNILAC w Darmstadt.

SPEAR - Pierścieniowy Akcelerator Pozytonowo-Elektronowy

Mamy tu do czynienia z wiązkami elektronów, które przyspieszane są w trzykilometrowym akceleratorze liniowym do energii około 2 GeV, a następnie wstrzykiwane do małych rozmiarów pierścienia akumulacyjnego. Podczas tych serii reakcji powstają pozytony. Wiązka elektronów oddziałuje z tarczą, aby wytworzyć silną wiązkę fotonów. Przy pomocy magnesów wyeliminowane zostają różne odłamki w postaci naładowanych cząstek.

Rezultatem zderzenia „czystej wiązki” fotonów z cienką tarczą jest wytworzenie pary cząstek tj. elektronu i pozytonu z przekształconej „czystej energii”. Energia każdej z tych cząstek równa się połowie energii dającego im początek fotonu, która jest pomniejszona o masę spoczynkową nowo utworzonej pary. Magnesy wybierają z obszaru zderzenia pozytony, a następnie wprowadzają je do pierścienia akumulacyjnego, gdzie przyspieszone elektrony krążą dookoła. Natomiast mające przeciwne ładunki elektryczne wiązki elektronów i pozytonów poruszają się w pierścieniu w przeciwnych kierunkach.

LEP - Akcelerator elektronowo – pozytonowy

3368 magnesów tworzy zderzacz, który powoduje zakrzywienie torów ruchów dwóch wiązek cząstek i utrzymuje je na orbicie. Dodatkowo naładowane pozytony zakrzywione są w jedną stronę, a ujemnie naładowane elektrony zakrzywiane są w stronę przeciwną. Dzięki takiemu układowi przy użyciu tych samych magnesów można uzyskać w akceleratorze wiązki elektronów i pozytonów o energii około 90 GeV, krążących w przeciwnych kierunkach.



Rys.1.2.7 LEP akcelerator w tunelu.

Synchrotron – to akcelerator kołowy z naładowanymi cząstkami, które krążą po stałych orbitach, na jakich utrzymuje je pole magnetyczne. Pole magnetyczne jest zwiększane wraz ze wzrostem prędkości naładowanych cząstek. Przyspieszane są także wtedy gdy przelatują przez szczelinę rezonatora, która powoduje zasilenie generatora wielkiej częstotliwości. Aby istniał stały promień obiegu cząstek, w miarę wzrostu pola magnetycznego energie przyspieszanych cząstek także rosną, dlatego też pole magnetyczne ulega automatycznemu

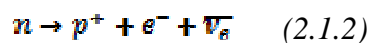
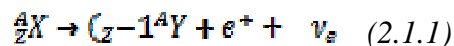
2.1 Rozpady promieniotwórcze

Rozpady promieniotwórcze dzielimy na kilka grup [5] :

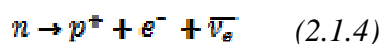
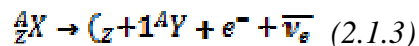
- rozpady z emisją promieniowania elektromagnetycznego o odpowiednio wysokiej energii
- rozpady z emisją cząstek ciężkich
- rozpady polegające na spontanicznym rozszczepieniu
- **rozpady, w których emitowane są cząstki lekkie (leptony)**

Interesuje nas ostatnia grupa rozpadów promieniotwórczych, czyli takich, w których emitowane są cząstki lekkie. Należą tu trzy rodzaje rozpadów β , a mianowicie β^+ , β^- i WE (wychwyty elektronów). [2]

Rozpad β^+



Rozpad β^-

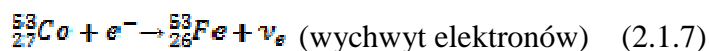


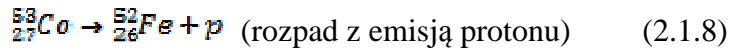
Wychwyty elektronów (WE):



Mówiąc ogólnie, jądra posiadające nadmiar elektronów w stosunku do protonów rozpadają się poprzez emisję elektronów (rozpad β^-), a posiadające nadmiar protonów (rozpad β^+) lub poprzez wychwyty elektronu atomowego. Niedobór neutronów w jądrze powoduje, że nie jest ono jądrem stabilnym i stara się zmniejszyć liczbę protonów przez rozpad β^+ lub przez WE, może też z mniejszym prawdopodobieństwem wyemitować proton. [4]

Schematy rozpadów ^{53}Co [8] :





We wszystkich równaniach ν_e oznacza neutrino elektronowe, czyli cząstkę nie posiadającą ładunku elektrycznego i tak minimalnej masy, że często pomijana jest w zapisie schematów rozpadu β w podręcznikach szkolnych. Dwa pierwsze procesy prowadzą do powstania ${}^{53}\text{Fe}$, który składa się z 26 protonów i 27 neutronów (mały nadmiar neutronów jądrze). W trzecim procesie powstaje jądro ${}^{52}\text{Fe}$ zbudowane z 26 protonów i 26 neutronów. W przedstawionych trzech możliwych procesach, rozpad z emisją protonu jest mało prawdopodobny.

Rozpad promieniotwórczy określa się wzorem [2] :

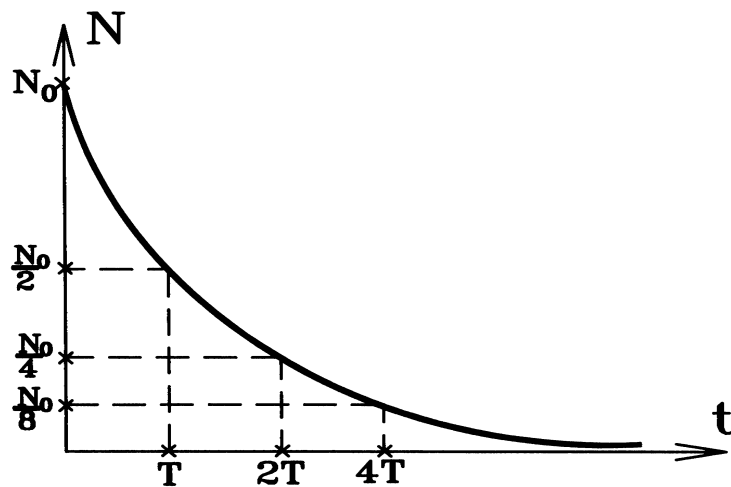
$$N = N_0 \cdot 2^{-t/T} \quad (2.1.9)$$

N_0 - początkowa liczba jąder

N - liczba jąder, które się jeszcze nie rozpadły

t - czas od chwili rozpoczęcia pomiaru

T - czas połowicznego rozpadu



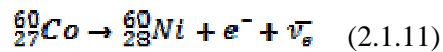
Rys. 2.1.10 Ilustracja przedstawiająca prawo rozpadu promieniotwórczego.

Przykłady izotopów promieniotwórczych [8]:

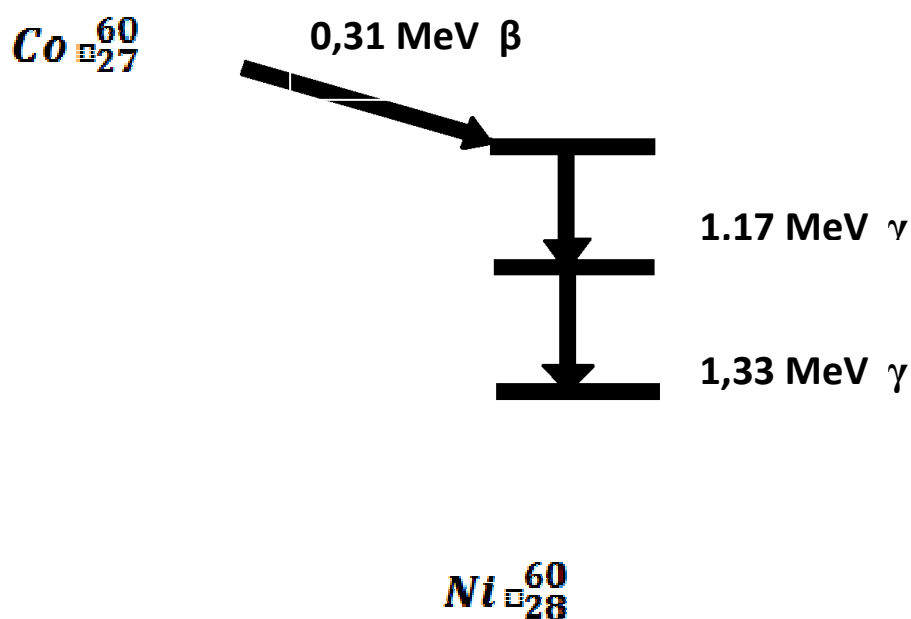
- ${}^{60}\text{Co}$ (**Kobalt - 60**) to promieniotwórczy izotop kobaltu sztucznie otrzymywany, jest wykorzystywany jako źródło promieniowania γ między innymi do napromieniowania komórek nowotworowych, gdyż jednemu rozpadowi towarzyszy emisja dwóch kwantów γ , a czas połowicznego rozpadu wynoszący 5,3 roku

umożliwia uzyskanie dużego natężenia promieniowania. Posiada 33 neutrony i 27 protonów.

Kobalt - 60 ulega rozpadowi β^- :

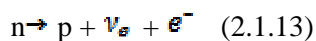


Podczas rozpadu tego izotopu uwolnione zostają dwa kwanty γ o energii 1,17 i 1,33 MeV.



Rys.2.1.12 Schemat rozpadu izotopu Kobaltu – 60.

Przemiana neutronu:



- ${}^{59}\text{Co}$ (**Kobalt – 59**) jest już stabilny, posiada 32 protonów i 27 neutronów.
- ${}^{58}\text{Co}$ (**Kobalt – 58**) posiada zbyt dużo protonów, ma niestabilne jądro (wychwył elektronu).

Przemiana protonu:



- ${}^{18}\text{F}$ (**Fluor – 18**) posiada niewielką liczbę neutronów, jest niestabilny.

Używane izotopy promieniotwórcze [3]:

1. Technet-99,
2. Potas-42,
3. Potas- 43,
4. Cez-129 ,
5. Wapń-47,
6. Chrom-51,
7. Fosfor-32,
8. Żelazo-59,
9. Ind-111,
10. Fluor-18,
11. Jod-125, 131 i 132,
12. Jod-131
13. Kobalt-60,
14. Cez-137.